

水圧式サンプラーを用いたサンプリング・サウンディング試験と他試験との比較

Comparison with sampling sounding test using hydraulic piston sampler and other static sounding tests

地盤工学分野 鈴木達也

本研究は、大阪市立大学で開発中の新しい原位置試験の静的サウンディング試験としての適用性を検討したものである。この原位置試験は、水圧式サンプラーを用いて実地盤から粘土試料を採取する時に発生する水圧を計測し、それを地盤の抵抗と考えることによって地盤の非排水せん断強さを評価するものである。非排水せん断強さについて、本試験による結果と普及している他のサウンディング試験の結果の比較検討を行った。その結果、本試験の静的サウンディング試験としての適用性が高いことを確認した。

This paper shows an applicability of a new in-situ test for a static sounding test, which has been currently developed by geotechnical engineering laboratory in Osaka City University. The proposed test will be carried out with soil sampling of soft clay using a hydraulic piston sampler. This test is able to evaluate an undrained shear strength of clay directly from a response water pressure recorded while the soil sampling is taking place. Comparison studies were carried out between proposed test and conventional tests on several parameters obtained. As a result of that, it was confirmed that the both outputs almost same undrained shear strength.

1. はじめに

比較的やわらかい粘土のサンプリングとして広く普及しているのが水圧式サンプラーである。この水圧式サンプラーに一定の流量速度で水を送ってサンプリングチューブ貫入させ（一定の貫入速度となる）、反力としての水圧（静的貫入抵抗に相当）を測定すれば、サウンディング試験にもなり得ると考えられる。この考えのもと、当研究室では水圧式サンプラーを用いたサンプリング・サウンディング（Sampling Sounding, 以下 SPS）試験を実施した¹⁾。その結果、水圧から求められる貫入抵抗 q_p と室内力学試験結果との相関性が確認され、相関式を得ることができた。今後、SPS 試験を一般的な静的サウンディングとして成立させるためには、既存の他試験との比較が必須である。

そこで本研究では、宅地調査の標準であるスウェーデン式サウンディング（Swedish Weight Sounding, 以下 SWS）試験と現在最も精度が高いと言われている電気式コーン貫入試験（Cone Penetration Test, 以下 CPT）との比較を行い、SPS 試験の静的サウンディングとしての適用性を検討することが目的である。結果比較は今年度実施した4地点に加え、過去に実施した5地点である。本稿では代表例として、滋賀県守山市今浜町での結果を報告する。

2. SPS 試験

2.1 試験方法

図-1 に SPS 試験装置の概要を示す。予めチューブヘッドより上部の管路を水で飽和し、定流量ポンプで送水し、サンプリングチューブを地盤に静的に貫入する。その際の水圧と流量速度を電磁流量計で計測する。圧力水がアウターチューブ下部の解放孔より排水され、水圧が急激に低下した時点を貫入終了とする。なお、チューブヘッドと固定ピストンのシール摩擦を補正するために、事前に空状態でサンプラーを押し出した時の水圧（これをキャリブレーションと称する）を測定し、それを用いて測定した水圧を補正する。さらにボーリングロッド内の静水圧も考慮して補正する。

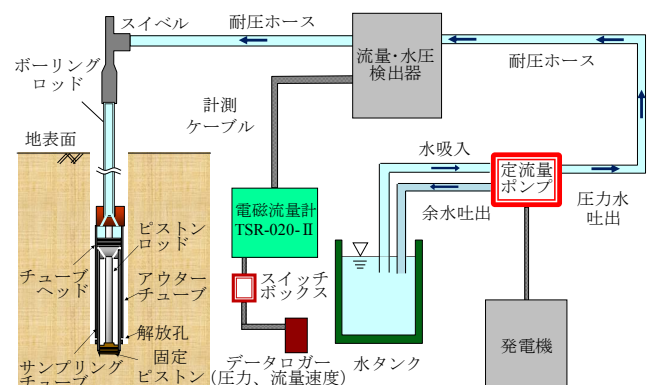


図-1 試験装置の概要

2.2 計測結果

図-2 に代表例として今浜での流量速度 q と水圧 p_m の計測結果を示す。図(1)の流量速度は、キャリブレーションと初期の立ち上りを除き、ほぼ 6.3 l/min で一定（貫入速度 25 mm/sec に相当）となった。

図(2)の水圧は、基本的に単調に上昇し、解放孔から水が排水された貫入終了時間 t_f (図中に ↓ で示す) で急激に低下している。ただし、T-1 は砂まじりシルト、T-3 の後半から T-4 の前半は細砂であり、水圧が増減しているが、逆に土質の変化を捉えているといえる。

2.3 貫入抵抗の整理方法

まず、計測した流量速度 q を貫入終了時間 t_f まで積算して流量を算出し、それをチューブヘッド断面積（ピストンロッドを除く）で除して貫入量に換算する（流量 4.2 l が貫入量 90 cm に相当する）。ただし、最終貫入量 h_f は実際の採取長 L （原則 90 cm ）と若干誤差が生じるので、補正係数 α ($\Delta L/h_f$) を乗じて補正貫入量 h を求めた（各ケースの α は今浜で、最小 0.93 、最大 1.07 、平均的には 1.04 であった）。

次に、計測した水圧 p_m から空作動時水圧 p_1 を差し引き、スイベルからボーリングロッド内の静水圧 p_2 を加え、補正水圧 $p (= p_m - p_1 + p_2)$ を求める。これにチューブヘッド断面積（ピストンロッドを除く）を乗じて貫入力 P を求める。ここで、 P の増加はサンプリングチューブ側面（内側と外側）と粘土との周面摩擦によると考えられるので、深度方向の P の増分 ΔP を周面積の増分 ΔA ($= (\text{内周} + \text{外周}) \text{長} \times \text{貫入量増分} \Delta h$) で除して貫入抵抗 q_p （応力値）を定義した。しかし、1秒間隔の測定値で q_p を求めると測定誤差によってバラツキが大きいので、3点間の移動平均で q_p を求めた。

図-3 に q_p と貫入量の関係を示す。図(1)の T-1、T-3、T-4 や図(2)の T-6、T-8 では貫入中に q_p の増減が見られる。これは砂まじりの層であったためである。今浜では採取された試料から、深度 15.9 m (T-13, $h=0.6 \text{ m}$ に相当) でアカホヤ火山灰 (K-Ah, 約 $7,300$ 年前に降灰)、深度 18.1 m (T-16, $h=0.8 \text{ m}$ に相当) で鬱陵隠岐火山灰 (U-Oki, 約 $10,000$ 年前に降灰) が確認されたおり、 q_p の変化として確認できる。

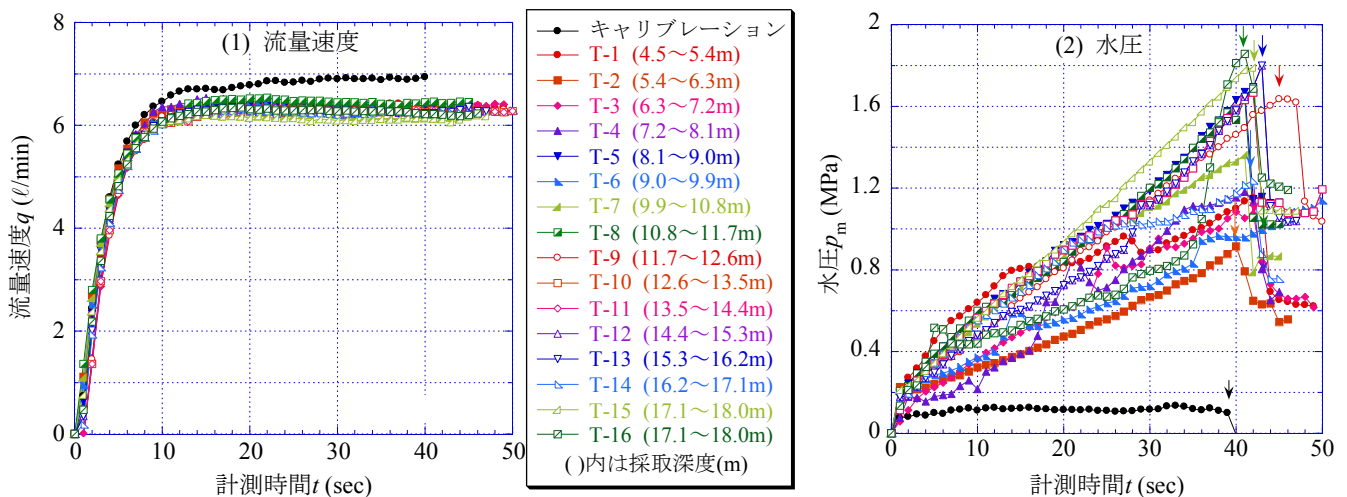


図-2 今浜での測定結果

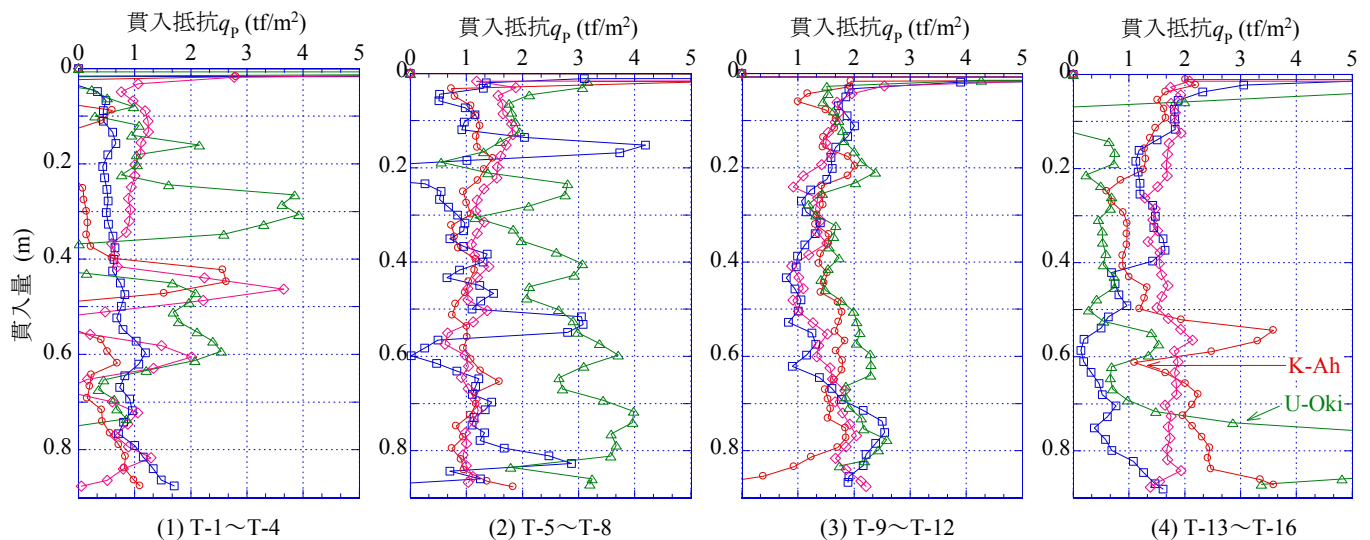


図-3 今浜の貫入抵抗 q_p と貫入量の関係

図-4(1)に貫入抵抗 q_p の深度分布を示す。これは全ケースの q_p を深さ方向に重ねたもので、地盤抵抗を捉えていると考えられる。しかし、 q_p は土質変化などによって増減が激しい場合があるので、各ケースの q_p を積分して貫入量で除し、平均化した代表貫入抵抗 q_p^* を●で図中に示している。全体的に q_p^* はほぼ深度方向に増加していることがわかる。ただし、深度 6.7m~7.7m までは細砂がまじっており、 q_p および q_p^* が大きく評価されている。一般的な粘土層であれば深度方向に単調増加すると予想されるが、T-14 で q_p^* が小さくなっているのは、鋭敏な粘土が原因と考えられる。鋭敏な粘土では、サンプリングチューブの貫入によってチューブ周面の粘土が練り返され、摩擦抵抗が低下するため、 q_p が小さく測定されたと考えられる。

図-4(2)に SPS 試験によって採取した試料を用いて行った力学試験（一軸圧縮試験、圧密試験）の結果を示す。圧密降伏応力 p_c は深度 8m 付近で一部大きな値をとっているが基本的に深度方向に増加し、有効土被り圧 p_0 を少し上回るやや過圧密な粘土である。一軸圧縮強さ q_u も p_c と同様に深度 8m 付近で一部大きな値をとり、深度方向に増加している。図(1)、(2)を比較すると、深度 17m 付近で q_p^* が減少していることを除けば、深度方向に調和した増加傾向が見られる。

図-4(3)、(4)に代表貫入抵抗 q_p^* と q_u および p_c との相関図を示す。図(3)、(4)でプロットの数異なるのは、それぞれ力学試験実施深度に相当する q_p^* を図(1)の

q_p^* から直線補間したためである。力学試験実施数だけプロットしたので、図(4)の方がプロットが多い。

図(3)の q_p^* と $q_u/2$ の相関では、回帰線に対してバラツキはあるものの、相関係数 $R=0.819$ となった。一軸圧縮試験は側方からの拘束がないので、塑性の低い粘土では応力解放により q_u は過小に評価される傾向がある。今浜の沖積粘土では大阪地域に見られるような塑性が弓型分布となるよう変化は見られないが、塑性が細かく増減する湖成粘土であった。これは琵琶湖に面した地点での堆積環境が細かく変化したものと推定できる。

一方、図(4)の q_p^* と $p_c/3$ の相関では、図(3)に比べてバラツキが大きく、 $R=0.653$ となった。ただし、回帰式の勾配はほぼ同じ値となった。図(1)、(2)を見比べると、深度 15m 以深で p_c は増加傾向にあるのに対し、 q_p^* は減少傾向にある。とりわけ、火山灰出現深度における p_c が大きい。この部分が回帰式に大きなバラツキを与えていることが分かる。

図-4 全体を見比べると、 q_p^* は p_c よりも q_u の方が相関性が高いことが分かる。また、 q_p および q_p^* は先に述べたようにサンプリングチューブ側面と粘土との摩擦を評価するものであり、粘土の粘着力 c に由来するので、測定しているもの自体が q_u とほぼ等価である。そこで、以下の整理では、SPS 試験で得られる q_p^* から非排水せん断強度 s_u を推定する際は図(3)の回帰式の勾配 $N=3.47$ を用いる。

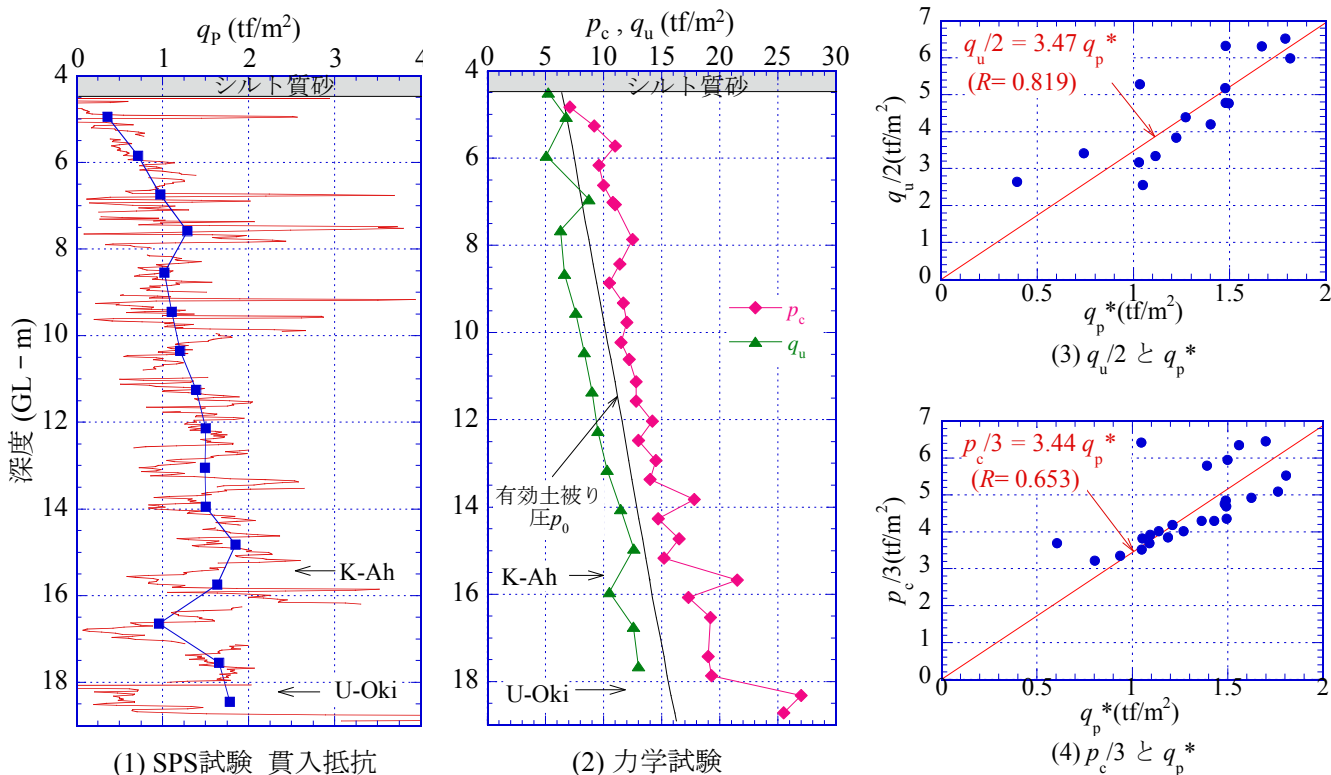


図-4 今浜の SPS 試験結果と力学試験結果の比較

3. スウェーデン式サウンディング試験

3.1 概要

SWS 試験は荷重による貫入と回転による貫入を併用した原位置試験であり、土の静的貫入抵抗を測定し、その硬軟または締まり具合を判定するとともに地層構成を把握することを目的としている。簡易なサウンディングのうちでは比較的貫入能力に優れており、深度 10m 以内の軟弱層を対象に、概略調査または補足調査などに用いられている。最近では戸建住宅など小規模建築物の支持力特性を把握する地盤調査法として標準的に用いられている。

3.2 試験方法

SWS 試験では最初に 50kN の荷重を載荷する。貫入が止まると荷重を増加する。荷重の段階は 0.05, 0.15, 0.25, 0.50, 0.75, 及び 1kN である。1kN (100kgf) でロッドの貫入が止まった場合は、鉛直方向の力が加わらないようにロッドを右回りに回転させ、荷重時とあわせて 10cm 貫入させるのに要する半回転数を測定する。荷重の大きさを N_{sw} 、貫入量に対する半回転数を、貫入量 1 m あたりの半回転数 N_{sw} に換算してまとめる。

3.3 結果と考察

図-5 に今浜での 5 機関による SWS 試験結果を示す。表層の砂礫層は貫入が困難だったため、一部の試験では 2m 程度、先行掘削している。表層約 4m は砂主体で図(1)~図(5)のいずれも N_{sw} が大きい。深度 4m より N_{sw} が単調増加している。先に述べたように、深度 15.9m でアカホヤ火山灰 (K-Ah)、深度 18.1m で鬱陵隠岐火山灰 (U-Ok) が出現しているが、 N_{sw} に影響は現れていない。深度 19m 付近で N_{sw} が大きな値を示しているのは、やや硬い砂まじりシルトに変わっているためで、土質の変化を捉えていると考えられる。

図-6 に SWS 試験結果から一軸圧縮強さ q_u を推定した結果を示す。なお、推定は稲田²⁾によって提案されている式(1)を用いている。

$$q_u = 45W_{sw} + 0.75N_{sw} \quad (1)$$

図-6 よりいずれも深さ方向に q_u が増加している。図-5 で目立たない火山灰の影響が確認できる。深度 19m 付近は砂まじりシルトであり、推定 q_u の増減は貫入時の砂の抵抗によるものである。ただし深度 4m までは砂質土で式の対象外のため推定できない。

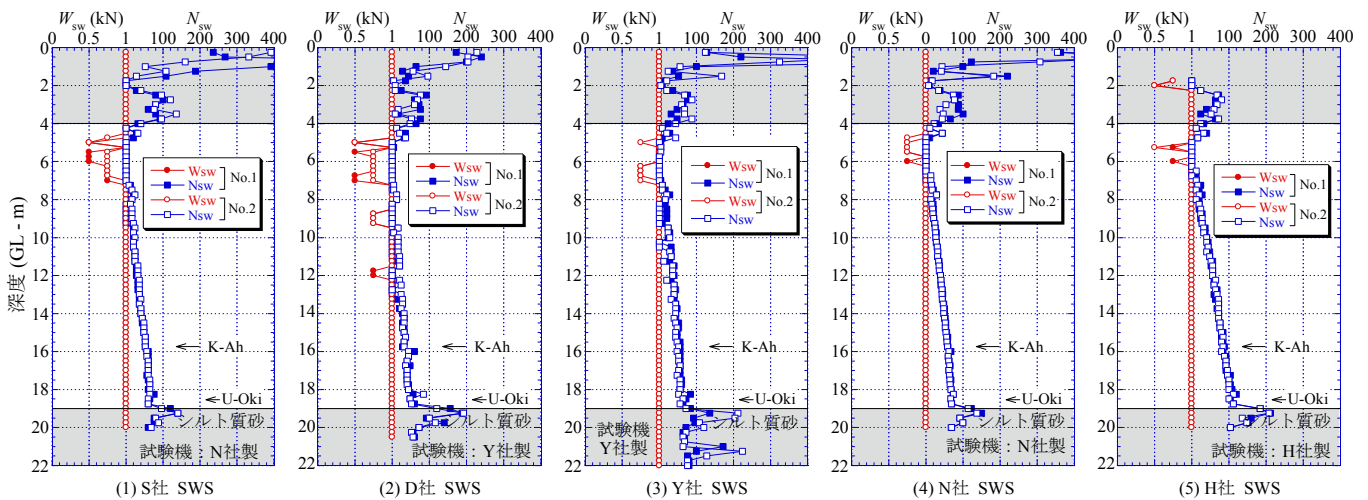


図-5 今浜の SWS 試験結果

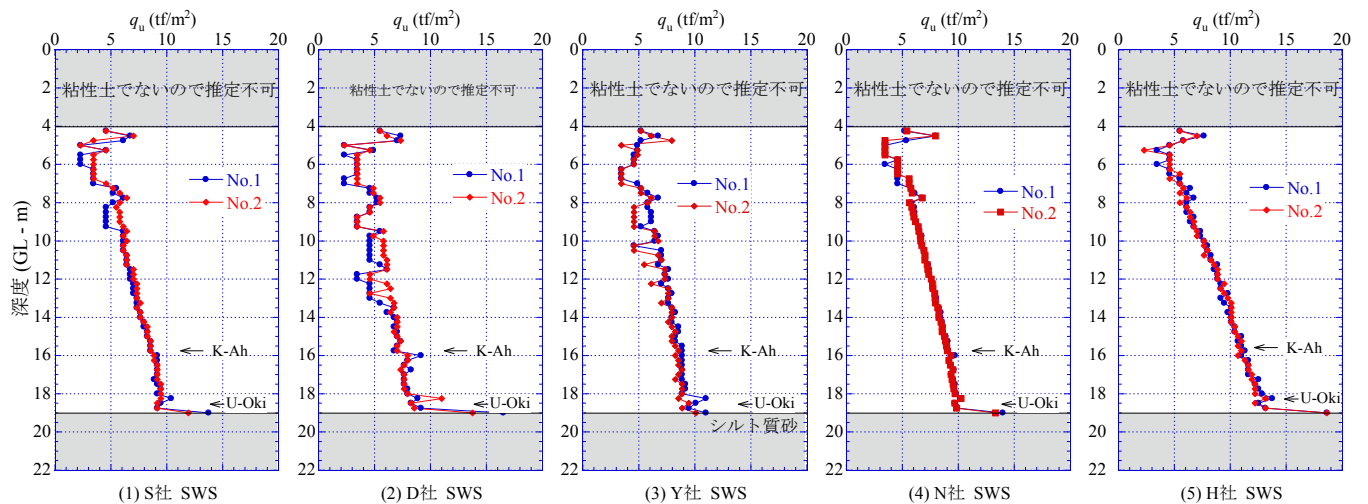


図-6 今浜の SWS 試験による推定 q_u

4. 静的コーン貫入試験

4.1 概要

CPTは地盤特性を連続的かつ高精度で把握できる方法で、設計に広く用いられている。地盤にコーンを静的に貫入させ、コーン先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧を求めることができる。大きな玉石、砂礫地盤以外の砂質土、粘性土、有機質土および火山灰といった広範な土質に適用可能で、地盤の地層区分、粘性土のせん断強さ、砂質土のせん断抵抗角、相対密度および液状化抵抗などを推定することができる。

4.2 試験方法

CPTでは貫入装置を用いてコーンを一定の速度で貫入させ、コーン先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧および深さを測定装置を用いて自動記録する。

4.3 結果と考察

図-7に今浜のCPT試験結果を示す。図(1)は補正コーン貫入抵抗 q_t 、図(2)は周面摩擦 f_s 、図(3)は間隙水圧 u_d である。図(1)では所々で q_t が大きくなっている。図(3)より、これらの深度では間隙水圧が静水圧と同等であることから、透水性のよい砂質土であることが分かる。深度4m以深の湖成粘土では貫入抵抗が漸増し、間隙水圧が静水圧よりもかなり大きいことから粘土であることが分かる。深度15.9mのアカホヤ火山灰(K-Ah)、深度18.1mの鬱陵隠岐火山灰(U-Oki)では q_t 、 f_s 、 q_n が増加し、砂質土と同様に排水性がよいので u_d は静水圧と同程度を示している。

CPTの貫入メカニズムは深い基礎の支持力と同じなのでTerzaghiの支持力公式により、 q_t を用いて非排水せん断強度 s_u を推定する式(2)が提案されている。

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (2)$$

図(4)は実効コーン貫入抵抗 $q_n = q_t - \sigma_{v0}$ 、図(5)は式(2)を用いてCPT結果から s_u を推定したものである。なお、

コーン係数は $N_{kt}=10$ を仮定している。 s_u は深度4m以深の粘性土層で深度方向に漸増しており、火山灰による土質変化もよく捉えられている。

補正コーン貫入抵抗 q_t あるいは土被り圧を考慮した実効コーン貫入抵抗 $q_n = q_t - \sigma_{v0}$ はコーンが貫入する際の土の強度を表している。一方、周面摩擦 f_s は一度コーン先端で乱された土による摩擦強度であり、いわば残留強度である。したがって、 q_t や q_n は f_s と異なる傾向がみられる。図(2)では、今浜での粘性土は粘土分含有率がほぼ一定で、深度4m～粘性土層で f_s は1～2tf/m²、深度19mからは砂層に入り大きくなり、シルト質砂層を挟んで腐植土層では3tf/m²を超えている。

5. 各試験の比較

SPS試験、SWS試験、CPTはいずれも静的サウンディングに相当する。SWS試験は式(1)により N_{sw} と W_{sw} から推定される一軸圧縮強さ q_u を求めた。CPTは式(2)より q_n と N_{kt} から s_u を推定している。SPS試験は2.3で記述した回帰式の勾配 N を用いて、代表貫入抵抗 q_p^* から $s_u = N \times q_p^*$ を推定し、すべての結果を s_u に換算して比較する。

また、SPS試験における貫入抵抗 q_p はサンプリングチューブの周面摩擦による。一方、CPTではコーンスリーブの周面摩擦 f_s を測定している。そこで両者の周面摩擦を比較する。

図-8に各試験結果の比較を示す。図(1)よりいずれの s_u も深度方向に増加しており、同程度の値である。粘性土での粒度は深度方向にほぼ一定であり、塑性の細かな変化は見られるが、全体として大きく地層の変化が見られないという今浜の特徴をよく捉えられている。CPTでは所々で増加がみられる。これはSWS試験のように回転貫入の抵抗ではなく閉塞コーンの先端抵抗を測定しているため、火山灰や砂などのシーム層を細かく捉えていると考えている。

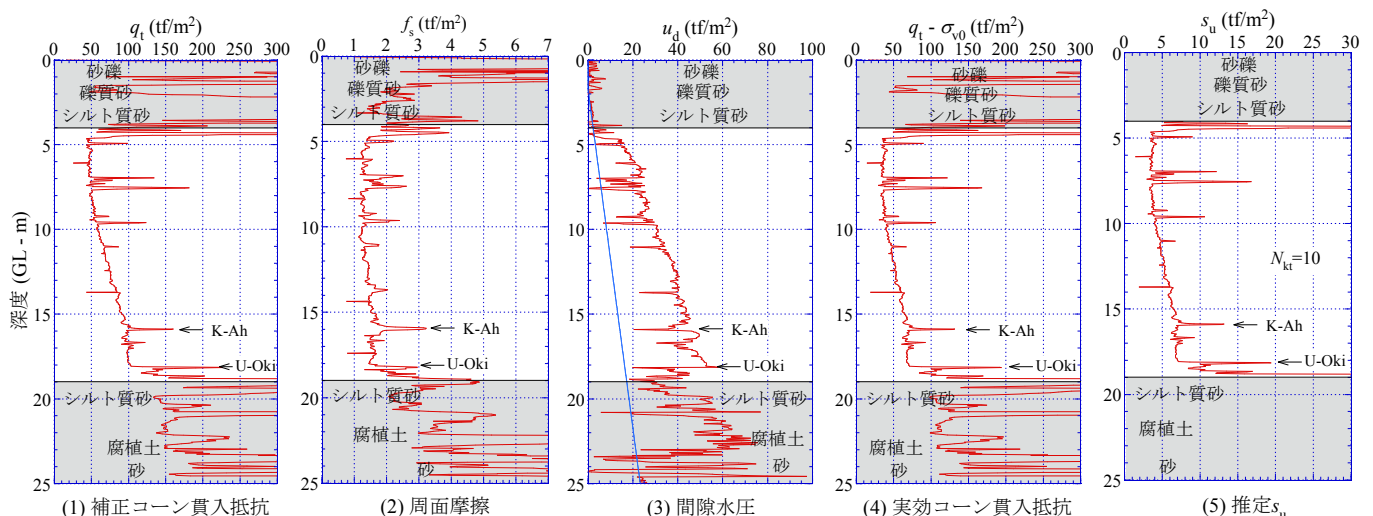


図-7 今浜のCPT結果

図(2)より CPT による周面摩擦 f_s に比べて SPS 試験から得られるチューブの摩擦 q_p はほぼ同じ値である。CPT による f_s はコーン先端によって一度乱された土による残留強度としての摩擦である。一方、SPS 試験による q_p はチューブ貫入に伴う摩擦力である。この摩擦には初めて土に貫入する際の摩擦と、すでにチューブが土中に貫入され部分にはたらく摩擦の両者である。後者はすでにチューブ側面によって擦られているため残留強度とも考えられる。図の結果より現整理方法による SPS 試験で周面摩擦をうまく評価できていると考えられる。

図(3)～図(8)に SPS 試験, SWS 試験, CPT を同時に実施した北海道勇払郡厚真, 東大阪市松原南, 千葉県浦安市高須での結果を同様に整理した。図(3), (5), (7)よりいずれの地点でも各試験による s_u は同程度の値を示している。ただし, 図(7)の SPS 試験結果の低下は深度 25m 以深での鋭敏な粘土が原因であると考えている。図(4), (6), (8)では f_s と q_p が鋭敏粘土部を除き, ほぼ一致している。

6. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 水圧式サンプラーに一定の流量速度で水を送り, 貫入時の水圧を測定した。水圧から計算される貫入抵抗 q_p は, 採取した試料を用いて得られた一軸圧縮強さ q_u , 圧密降伏応力 p_c との相関が確認された。さらに q_p を平均化した代表貫入抵抗 q_p^* と p_c , q_u との相関式を得ることができた。
- (2) SPS 試験結果と力学試験(一軸圧縮試験, 圧密試験)の相関式を用いて算出した非排水せん断強度 s_u の深度分布は, SWS 試験および CPT 結果から推定される s_u と整合する。

参考文献

- 1) 鈴木達也: 水圧式サンプラーを用いた新しいサンプリング・サウンディング試験の開発, 大阪市立大学卒業論文, 2009.
- 2) 稲田倍穂: スウェーデンサウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, vol.8, No.1, pp13~18, 1960.

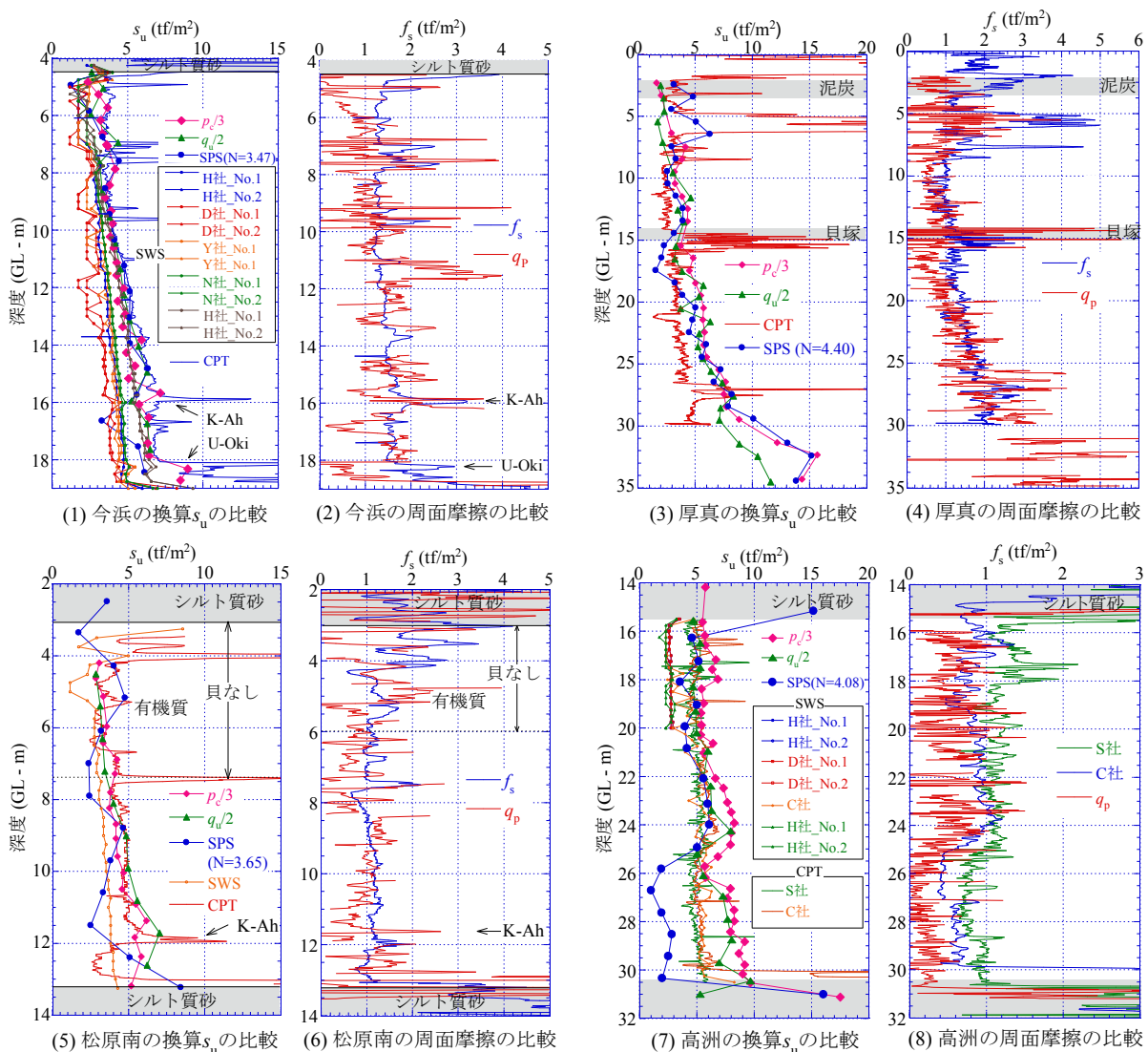


図-8 試験結果の比較

討議

討議 [山口 隆司]

他試験との比較で何が得られてのか。オリジナリティはどこか。

回答

SPS 試験による非排水せん断強度 s_u の比較により、SPS 試験が軟弱粘土を対象として静的サウンディング試験結果と同様な結果を示すことから、本試験の現在の整理方法は静的サウンディングとして適用可能であることが分かった。しかし、鋭敏な粘土では強度を小さく評価してしまうことから、現段階では通常の粘性土が対象範囲である。さらに、貫入抵抗 q_p と CPT による周面摩擦の比較では、両者に高い相関が得られた。どちらも残留強度を表すことから、土質の違いの影響を受けていることも確認することができた。CPT と同様に連続的に地中の強度を捉えることができることが分かった。以上が私の研究によって新たに分かったことで、SPS 試験の開発において有用な研究内容であると判断する理由である。

討議 [鬼頭 宏明]

SPS 試験機の現場での機動性はどうか。作業人数は何人くらい必要か。

回答

試験自体は、1 人いれば可能である。ポンプやデータロガーの配置を工夫すれば、両手の届く範囲で試験、測定が可能である。ボーリングマシンを動かすオペレーターは通常 2 人である。試験時はボーリングマシンを動かさないで、オペレーターの手は空いている。将来的に本試験が実用化された際は、現状通り 2 人のオペレーターで作業可能である。

討議 [角掛 久雄]

整合性が良いとあるが、すぐにでも実用可能か。

回答

SPS 試験と他の静的サウンディングとの整合性は良いが、いくつかの課題が残っている。

一つ目は、鋭敏性の考慮である。貫入抵抗を小さく評価しており、実際の強度を如何にして評価するか、あるいはどの程度の鋭敏性を判断するかが課題である。また、室内試験せずに採取試料が鋭敏かどうかを判断するには採取試料の上部、および先端の観察のみであり、不十分である。

二つ目は、相関図の回帰式の引き方である。現在は簡単のため、原点を強制通過するように引いているが、

切片を設けた場合、切片の考え方が説明できない。切片は現場のバラツキで、データを蓄積すれば原点を通るかもしれない。切片に関する検討は今後もデータを蓄積する中で明らかになるであろう。

討議 [谷口 与史也]

SPS 試験で水圧を測定しているのはどの部分か。

回答

ポンプからの吐出直後の水圧を測定しており、実際にチューブ貫入の際の水圧には静水圧と摩擦を考慮する必要があるので補正を行っている。